引文格式：索世恒,韩昆,张永峰. 伽利略高精度服务产品与其全球定位性能评估[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 100-104. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.020

伽利略高精度服务产品与其全球定位性能评估

索世恒[1]，韩　昆[2]，张永峰[3*]
（1. 文化和旅游部信息中心，北京 100740；2. 青海省自然资源综合调查监测院，青海 西宁 810000；
3. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心，湖北 武汉 430079）

摘　要：伽利略（Galileo）高精度服务（HAS）可在全球范围内提供公开、免费的高精度实时精密单点定位（PPP）服务。为了评估Galileo HAS在全球不同区域的性能，对当前HAS产品精度及其全球定位性能展开了分析。结果表明，GPS和Galileo卫星轨道的平均用户测距误差分别为0.042 m和0.033 m，空间信号测距误差的标准差分别为0.20 ns和0.10 ns。全球不同区域的HAS PPP收敛时间有明显差异，以68%置信水平达到平面精度0.2 m、高程精度0.4 m为收敛指标，欧洲区域测站平均收敛时间最短，仅为28 min；非洲区域测站平均收敛时间为39 min，美洲和亚太区域测站的平均收敛时间为51 min和85 min。

关键词：Galileo；HAS；星基增强系统；PPP
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0100-05

Galileo High Accuracy Service Product and Its Global Positioning Performance Evaluation

SUO Shiheng[1], HAN Kun[2], ZHANG Yongfeng[3]
(1. Information Center, Ministry of Culture and Tourism of the People's Republic of China, Beijing 100740, China;
2. Institute of Qinghai Provincial Natural Resources Survey and Monitoring, Xining 810000, China;
3. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Galileo high accuracy service (HAS) can provide open and free high-precision real-time precise point positioning (PPP) service around the world. In order to evaluate the performance of Galileo HAS in different regions of the world, we evaluated the accuracy and global positioning performance of HAS products. The results show that the average orbit user range errors of GPS and Galileo satellites are 0.042 m and 0.033 m, respectively. The signal in space range errors are 0.20 ns and 0.10 ns for GPS and Galileo, respectively. There is a significant difference in the convergence time of HAS PPP in different regions of the world. With 68% confidence level reaching 0.2 m in horizontal and 0.4 m in vertical components as convergence indicators, the average convergence time of stations in Europe is significantly lower than that in other regions, only 28 min, while the average convergence time of stations in Africa is 39 min, and the average convergence times of stations in the Americas and Asia Pacific regions are 51 min and 85 min, respectively.

Key words: Galileo, HAS, satellite-based augmentation system, PPP

基于全球导航卫星系统（GNSS）的精密单点定位（PPP）技术可提供实时厘米级、分米级的高精度定位，具有单机作业、操作简单、机动灵活、不受距离限制等综合优势，被广泛应用于自动驾驶、智能导航、精密农业和海洋测绘等领域[1-3]。PPP技术的定位性能严重依赖于卫星轨道和钟差产品的精度。利用地面网络通信，国际GNSS服务组织（IGS）的实时服务可为全球PPP用户提供状态域的实时精密轨道钟差改正数，但当互联网不可用或网络中断时，将极大地降低PPP的精度或导致其不可用。目前各大GNSS服务提供商正积极发展建设其星基增强服务[4-5]，因此PPP用户直接接收GNSS导航星座播发的卫星轨道钟差等改正数成为一种新的应用趋势。

日本准天星卫星系统的厘米级增强服务和中国北斗系统的PPP-B2b增强服务通过导航卫星为亚太区域的PPP用户提供高精度卫星轨道钟差等改正数，可实现分米级定位和亚纳秒授时精度[6-9]。而伽利略（Galileo）高精度服务（HAS）可在全球范围内免费提供Galileo和全球定位系统（GPS）卫星的实时卫星轨道、钟差、码偏差产品。2023年1月24日Galileo卫星正式通过E6-B信号以10 s间隔向全球用户提供HAS初始服务阶段产品。在其全面服务阶段，PPP用户可

收稿日期：2024-05-15。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2022YFB3904602）。
第一作者简介：索世恒（1976—），本科，高级工程师，从事信息安全、空间信息与电子技术等工作，E-mail：suoshiheng@mct.gov.cn。
通信作者：张永峰（1985—），本科，工程师，研究方向为CORS软件数据与系统建设等，E-mail：421000556@qq.com。

在全球范围5 min内实现95%的水平和垂直定位精度分别优于0.2 m和0.4 m。对于HAS服务性能的评估，Fernandez-Hernandez I[10]等分析HAS早期测试阶段产品发现，Galileo和GPS卫星的空间测距误差（SISRE）分别为9.5 cm和16 cm；Hauschild A[11]等则将HAS产品用于近地轨道卫星的精密定轨，研究表明HAS产品用于机载处理可降低低轨卫星处理延迟，并提高低轨卫星定轨精度。虽然Nacer N[12]等的测试结果显示，PPP水平和垂直方向定位精度分别达到13.1 cm和18.6 cm，但后续更多的定位结果表明HAS PPP仍需要较长的收敛时间[13-15]。上述研究均针对HAS早期测试阶段产品，而对HAS开通后初始服务阶段产品性能的评估较少，尤其是对全球不同区域PPP性能的评估。因此，本文首先详细介绍了HAS及其在用户端的应用方法；再通过与德国地学研究中心精密轨道钟差产品进行比较；分析了HAS产品的精度；最后利用Galileo HAS产品开展PPP验证，对全球不同区域的HAS PPP性能进行了全面分析。

1　产品模型与方法

1.1　HAS产品使用方法

HAS产品包括卫星轨道改正和钟差改正，使用时需将HAS产品改正到对应的广播星历上。HAS轨道改正数提供的是卫星轨道坐标系中的改正向量，卫星轨道坐标系由径向、法向和切向3个向量构成。将其改正到对应的广播星历需提前进行坐标转换，计算公式为：

$$\delta \boldsymbol{X}^s = \left[\boldsymbol{e}_{\text{radial}} \quad \boldsymbol{e}_{\text{along}} \quad \boldsymbol{e}_{\text{cross}}\right] \times \delta O^s \tag{1}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_{\text{along}} = \dfrac{\dot{X}^s_{\text{brdc}}}{\left|\dot{X}^s_{\text{brdc}}\right|} \\ \boldsymbol{e}_{\text{cross}} = \dfrac{X^s_{\text{brdc}} \times \dot{X}^s_{\text{brdc}}}{\left|X^s_{\text{brdc}} \times \dot{X}^s_{\text{brdc}}\right|} \\ \boldsymbol{e}_{\text{radial}} = \boldsymbol{e}_{\text{along}} \times \boldsymbol{e}_{\text{cross}} \end{cases} \tag{2}$$

式中，$\delta \boldsymbol{X}^s$ 为转换后地固系中的卫星轨道改正向量；δO^s 为HAS产品提供的卫星轨道坐标系下的改正数；$\boldsymbol{e}_{\text{radial}}$ 为径向单位向量；$\boldsymbol{e}_{\text{along}}$ 为切向单位向量；$\boldsymbol{e}_{\text{cross}}$ 为法向单位向量；X^s_{brdc}、$\dot{X}^s_{\text{brdc}}$ 分别为由广播星历计算得到的卫星位置和速度矢量。

计算得到 $\delta \boldsymbol{X}^s$ 后，将HAS改正产品的星历龄期（IODE）与实际广播星历的IODE进行匹配，即可得到改正后的卫星位置 X^s_{HAS}，计算公式为：

$$X^s_{\text{HAS}} = X^s_{\text{brdc}} + \delta \boldsymbol{X}^s \tag{3}$$

对于钟差改正数 δC^s，同样将其改正到对应的广播星历钟差 t^s_{brdc} 上，计算公式为：

$$t^s_{\text{HAS}} = t^s_{\text{brdc}} + \frac{\delta C^s}{\text{c}} \tag{4}$$

式中，t^s_{HAS} 为改正后的钟差；c为真空中光速。

1.2　PPP方法

PPP常用无电离层（IF）组合观测值消除一阶电离层延迟影响，以GNSS接收机r和导航卫星s为例，IF组合观测方程的表达式为：

$$\begin{cases} P^s_{\text{r,IF}} = \rho^s_{\text{r}} + \text{c} \times t_{\text{r}} - \text{c} \times t^s + m^s_{\text{r}} \times Z_{\text{r}} + \epsilon_{P,\text{IF}} \\ \varphi^s_{\text{r,IF}} = \rho^s_{\text{r}} + \text{c} \times t_{\text{r}} - \text{c} \times t^s + m^s_{\text{r}} \times Z_{\text{r}} + N^s_{\text{IF}} + \epsilon_{\varphi,\text{IF}} \end{cases} \tag{5}$$

式中，$P^s_{\text{r,IF}}$、$\varphi^s_{\text{r,IF}}$ 分别为IF组合的伪距观测值和相位观测值；ρ^s_{r} 为接收机r和卫星s的几何距离；t_{r} 为接收机钟差；t^s 为卫星钟差；Z_{r} 为天顶湿延迟，对流层干延迟可用模型较精确计算，定位中只估计 Z_{r}；m^s_{r} 为对流层湿延迟投影函数；N^s_{IF} 为IF组合浮点模糊度；$\epsilon_{P,\text{IF}}$、$\epsilon_{\varphi,\text{IF}}$ 分别为伪距和相位的多路径、噪声和未模型化误差。

采用HAS产品精密轨道和钟差改正后，卫星的轨道误差和钟差可认为被消除，在估计中伪距硬件延迟被接收机钟差参数吸收。由式（5）可知，待估参数为卫星测站坐标、接收机钟差、对流层湿延迟和模糊度参数，本文采用平方根信息滤波方法对未知参数进行估计。对于定位精度评估，以精密星历的事后解坐标为真值，评估HAS产品的定位性能，其中收敛时间统计以定位达到平面精度0.2 m、高程精度0.4 m为收敛标准。

2　实验分析

2.1　实验数据与策略说明

根据HAS产品使用方法、IF组合PPP模型和估计算法，本文选取2023-04-01—2023-04-30共30 d的HAS产品进行HAS产品精度评估和定位验证。用于定位验证的全球125个多GNSS实验（MGEX）测站分布见图1，均为MGEX基准站，观测环境与数据质量均较理想，可用于评估HAS产品在理想环境下的定位性能。本文采用GPS和Galileo卫星观测数据进行PPP，具体数据处理策略见表1。

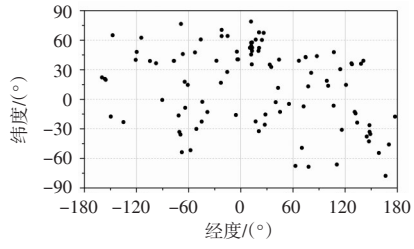


图1　定位测站分布图

表1 PPP处理策略

项目	模型
卫星轨道和钟差	广播星历+HAS产品
电离层	IF组合消除一阶项，忽略高阶项
对流层	干延迟：全球气压气温模型改正；湿延迟：随机游走估计
卫星天线相位中心	igs14.atx
相对论	IERS2010
接收机钟差	白噪声参数
模糊度	每个弧段按常数估计，浮点解
观测值	GPS：L1/L2；Galileo：E1/E5a
截止高度角	7°
处理间隔	30 s
估计方法	平方根信息滤波

2.2 Galileo HAS产品精度评估

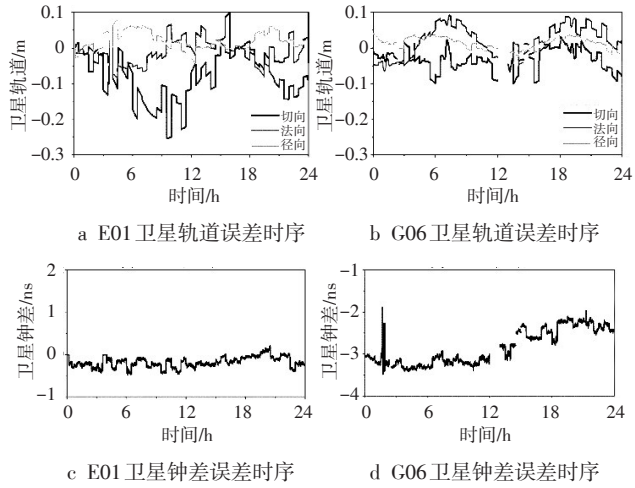
为评估HAS产品精度，首先将HAS轨道钟差产品与德国地学研究中心精密轨道钟差产品（GBM）进行比较。这两种产品的比较必须考虑卫星轨道产品参考点和钟差参考信号两方面的差异：①GBM产品提供的卫星轨道是卫星质心位置，而HAS轨道产品是卫星天线相位中心位置，二者的比较需进行天线相位中心改正，GPS和Galileo卫星的天线相位中心改正信息可从卫星天线文件igs14.atx中获取，本文利用卫星天线相位中心改正信息将HAS轨道产品改正至卫星质心位置，再与GBM轨道产品作差，最后将差值转换到轨道坐标系中进行分析；②HAS钟差产品给出的是Galileo E1-E5a和GPS C1C-C2P IF组合钟差，而GBM钟差产品给出的是Galileo E1-E5a和GPS C1W-C2W IF组合钟差，因此本文利用HAS的时延偏差将GPS卫星钟差产品转换至C1P-C2P组合，且由于二者的时间基准不同，存在系统性偏差，为消除时间基准偏差对评估精度的影响，将HAS钟差产品与GBM事后精密钟差作二次差[16]。

此外，为分析HAS产品精度对用户定位性能的影响，本文还计算了用户测距误差（URE）和SISRE。URE和SISRE考虑了卫星轨道不同方向误差在测距方向的投影，URE只考虑卫星位置误差，而SISRE同时考虑卫星位置误差和钟差误差，计算公式为：

$$\begin{cases}\epsilon_{\mathrm{URE}}=\sqrt{(\alpha\times\Delta R)^2+\beta(\Delta A^2+\Delta C^2)}\\ \epsilon_{\mathrm{SISRE}}=\sqrt{(\alpha\times\Delta R-\mathrm{c}\times T)^2+\beta(\Delta A^2+\Delta C^2)}\end{cases}\tag{6}$$

式中，ΔR、ΔC和ΔA分别为HAS轨道产品和事后精密产品在径向、法向和切向上的差值；T为钟差；c为光速；α、β为相应的加权因子，与卫星高度有关，本文中GPS的α、β分别取值0.98和1/49；Galileo的α、β分别取值0.98和1/61。

2023-04-01HAS产品E01和G06卫星的轨道钟差产品误差时间序列见图2，可以看出，相较于卫星轨道径向，切向和法向的误差较大，其中E01和G06卫星轨道径向误差基本在±0.05以内，但E01卫星的切向误差最大值超过0.2 m；E01和G06卫星轨道误差时间序列存在明显的跳变，这可能与HAS卫星轨道产品来源于滑动解算的超快速轨道有关。对于卫星钟差产品，E01和G06卫星的钟差误差时序也存在明显的跳变，这一方面是因为卫星轨道产品存在跳变，而钟差与轨道产品耦合，因此也存在跳变；另一方面可能是因为目前HAS产品稳定性不足，G06卫星钟差在2 h左右还存在一段粗差。对于产品完整性，E01和G06卫星除部分时段产品缺失外，其他完整性均超过了95%。



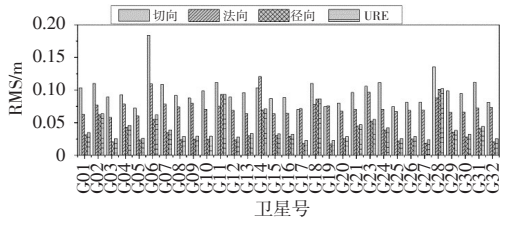
a E01卫星轨道误差时序　b G06卫星轨道误差时序

c E01卫星钟差误差时序　d G06卫星钟差误差时序

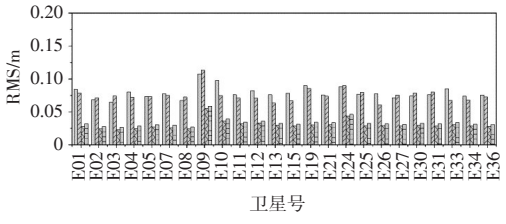
图2 HAS产品卫星轨道和钟差误差时间序列

GPS和Galileo卫星一个月的轨道和URE误差均方根（RMS）统计见图3，可以看出，G06卫星的切向误差RMS最大，达到0.183 m，整体上Galileo卫星的轨道精度优于GPS卫星。GPS卫星切向、法向和径向轨道误差的平均RMS分别为0.097 m、0.074 m和0.038 m，而Galileo卫星切向、法向和径向轨道误差的平均RMS分别为0.079 m、0.075 m和0.030 m。尽管GPS切向误差较大，但其对测距方向的用户定位性能影响有限，GPS和Galileo卫星URE平均值分别为0.042 m、0.033 m，主要受卫星轨道径向误差影响。

考虑到卫星钟差和轨道误差耦合，而SISRE可反映卫星轨道和钟差产品的综合性能。此外，相较于RMSE，PPP更关注卫星钟差误差和SISRE的标准差（STD）。GPS和Galileo卫星一个月卫星钟差和SISRE的STD见图4，可以看出，GPS卫星钟差精度明显低于Galileo卫星，GPS卫星钟差平均STD为0.33 ns，Galileo为0.17 ns，这主要是因为GPS卫星钟差存在较多的跳变和粗差。GPS和Galileo卫星的SISRE STD分别为



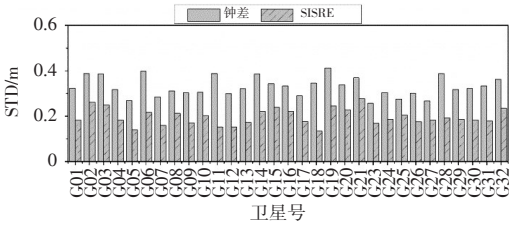
a GPS卫星轨道精度



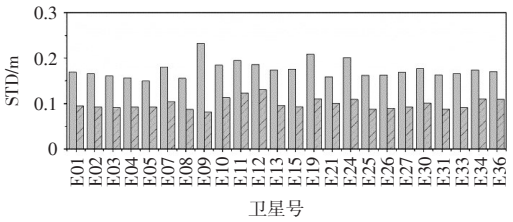
b Galileo卫星轨道精度

图3　HAS产品卫星轨道和URE精度

0.20 ns和0.10 ns，该精度与目前IGS各分析中心提供的实时产品还有较大差距[17]。



a GPS卫星钟差与SISRE精度



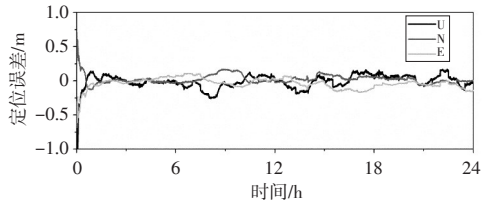
b Galileo卫星钟差与SISRE精度

图4　HAS产品卫星钟差与SISRE精度

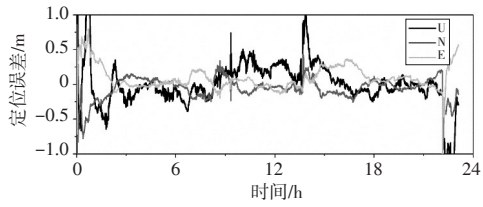
2.3　基于Galileo HAS的PPP性能评估

为验证Galileo HAS的实时PPP性能，本文采用2023-04-01—2023-04-30共30 d的HAS产品和全球125个测站数据进行仿实时动态PPP实验，并将定位结果与IGS周解坐标的参考值进行比较。本文将平面和垂直方向的收敛时间分别定义为达到0.2 m和0.4 m精度所需的时间。

BRUX（欧洲）和WUH2（中国）测站在2023-04-02的实时动态PPP误差时间序列见图5，可以看出，BRUX测站的定位误差时序更平缓，收敛后U、N、E方向定位误差均在0.2 m以内，而WHU2测站收敛时间更长且出现了重收敛和精度跳跃情况，其原因在于观测卫星数较少，BRUX和WUH2测站的平均观测卫星数分别为17.6颗和11.8颗，较少的观测卫星数降低了PPP的收敛速度和解算精度，并在部分时刻导致PPP重收敛。BRUX测站收敛后U、N、E方向的定位误差分别为0.08 m、0.06 m和0.07 m，WUH2测站收敛后N、E、U方向的定位误差为0.36 m、0.14 m和0.16 m，两个测站收敛后的定位精度均可达到分米级。



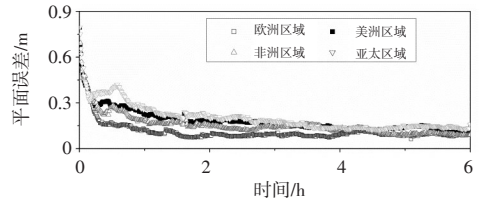
a BRUX测站定位误差时序



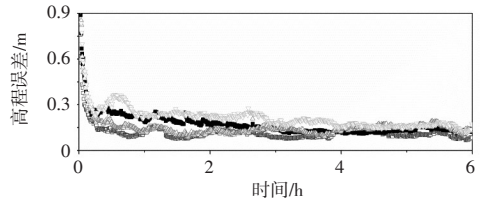
b WUH2测站定位误差时序

图5　2023-04-02的PPP误差时间序列

由上述分析可知，HAS服务性能在不同区域差异较大，因此本文将图1的定位测站划分为欧洲、美洲、非洲和亚太4个区域，各区域2024-04-02的PPP平面和高程定位收敛情况见图6，可以看出，以平面精度0.2 m、高程精度0.4 m为收敛标准，各区域的高程方向定位结果收敛时间明显短于平面方向，高程方向基本可在几分钟内实现收敛指标，而平面方向在亚太区域则需1.7 h才能实现收敛指标；不同区域测站的收敛时间有显著差别，欧洲区域测站的收敛速度最快，非洲区域次之，美洲和亚洲区域测站的收敛时间较长，这主要是因为HAS产品在欧洲区域的可视卫星数最多，其PPP的几何条件更好、收敛更快。从定位精度结果来看，随着收敛时间的增加，收敛4 h后各区域测站的平面和高程定位精度相当，均约为0.15 m。



a 平面误差收敛时间序列



b 高程误差收敛时间序列

图6　2023-04-02不同区域的PPP误差时间序列

注：置信水平为68%。

不同区域连续一个月的定位收敛时间见图7，收敛时间的统计标准为平面与高程均达到HAS定位指标的时间，可以看出，欧洲区域测站的平均收敛时间明显短于其他区域，仅为28 min，非洲区域测站的平均收敛时间为39 min，美洲和亚太区域测站则为51 min和85 min；此外，同一区域不同天的定位结果也存在较大差异，如欧洲区域在年积日第98天的收敛时间仅为18 min，而在年积日第116天的收敛时间却为65 min，这进一步验证了目前HAS产品的精度与稳定性还有待进一步提高。

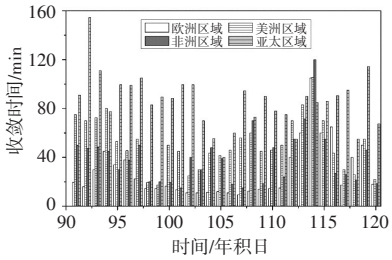


图7 不同区域的PPP收敛时间

注：置信水平为68%。

为分析Galileo HAS在全球范围内的定位整体性能，本文统计了所有测站一个月的平面和高程定位误差序列（图8），可以看出，测站收敛到平面精度0.2 m、高程精度0.4 m所需的时间为52.0 min、5.0 min，收敛2 h后平面定位精度为0.132 m，高程定位精度为0.124 m。实验结果表明，当前HAS产品的定位性能距其承诺的全球范围5 min内实现平面0.2 m、高程0.4 m的定位精度（95%置信水平）仍有较大差距，其原因在于HAS产品的卫星钟差精度不稳定。

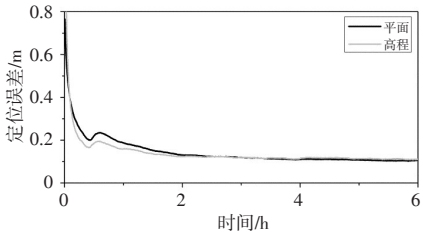


图8 所有测站PPP的收敛时间序列

注：置信水平为68%。

3 结 语

本文采用2023-04-01—2023-04-30的HAS产品详细评估了HAS产品中轨道和钟差产品的精度。Galileo卫星轨道精度优于GPS卫星，GPS和Galileo卫星轨道URE平均值分别为0.042 m和0.033 m；GPS卫星钟差精度明显低于Galileo卫星，GPS和Galileo卫星的钟差平均STD分别为0.33 ns、0.17 ns；GPS和Galileo卫星的SISRE STD分别为0.20 ns和0.10 ns。

本文采用125个全球测站进行HAS产品PPP的性能验证，结果表明，在68%置信水平下，受不同区域HAS产品可视卫星数不同的影响，不同区域测站收敛时间不同，其中欧洲区域测站的平均收敛时间最短，仅为28 min，非洲区域测站的平均收敛时间为39 min，美洲和亚太区域测站的平均收敛时间为51 min和85 min。所有测站一个月的定位结果表明，测站收敛到平面精度0.2 m、高程精度0.4 m所需时间为52.0 min、5.0 min（68%置信水平），收敛2 h后平面、高程定位精度分别为0.132 m和0.124 m。

当前HAS产品的定位性能距其承诺的全球范围5 min内实现平面0.2 m、高程0.4 m的定位精度（95%置信水平）仍有较大差距。随着HAS的建设和发展，更高精度和稳定性的卫星轨道和钟差产品以及基于相位偏差的PPP模糊度固定都有望进一步提升HAS服务性能。

参考文献

[1] Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3):5 005-5 017

[2] 李杨，高淑照，惠晨亮，等. BDS在铁路工程测量应用中的精度分析[J]. 导航定位学报，2022，10(4):138-144

[3] 李兆哲，戴吾蛟，郑彬，等. 复杂城市环境多模RTK/SINS紧组合定位性能分析[J]. 导航定位学报，2021，9(5):54-65

[4] Liu C, Gao W G, Liu T X, et al. Design and Implementation of a BDS Precise Point Positioning Service[J]. Navigation, 2020, 67(4):875-891

[5] Tang C P, Hu X G, Chen J P, et al. Orbit Determination, Clock Estimation and Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(9):60

[6] 肖鹏，孙付平，张伦东，等. 北斗三号PPP-B2b服务实时动态定位性能分析[J]. 导航定位学报，2023，11(5):21-28

[7] 宋伟伟，赵新科，楼益栋，等. 北斗三号PPP-B2b服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2023，48(3):408-415

[8] 宋伟伟，宋敞晟，何倩倩，等. 高精度电离层产品增强PPP-B2b定位性能分析[J/OL]. (2023-07-14)[2024-04-27]. https://doi. org/10.13203/j.whugis20230030

[9] 姚夏，李志敏，吴如楠，等. 北斗三号PPP-B2b信号时间同步性能分析[J]. 导航定位学报，2023，11(4):84-89

[10] Fernandez-Hernandez I, Chamorro-Moreno A, Cancela-Diaz S, et al. Galileo High Accuracy Service: Initial Definition and Performance[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3):1-18

[11] Hauschild A, Montenbruck O, Steigenberger P, et al. Orbit Determination of Sentinel-6A Using the Galileo High Accuracy Service Test Signal[J]. GPS Solutions, 2022, 26(4):1-13

（下转第121页）